

سیستم ترمز ضدقفل (ABS)

کاربردی از سیستمهای کنترلی در خودروهای پیشرفته

بهزاد صمدی

خودروهای امروزی از نیاکان خود بسیار هوشمندترند. آنها ایمن تر، سریع تر، ساکت تر، و کم مصرف ترند و آلودگی کمتری ایجاد می کنند. بدون شک سیستمهای کنترلی خودرو سهم زیادی در ایجاد این برتریها دارند. یکی از این سیستمهای کنترلی، سیستم ترمز ضدقفل^۱ (ABS) است. در این مقاله ابتدا توصیف مختصری از این سیستم و اهداف و اجزای آن آورده شده است. سپس درباره الگوریتم کنترل سیستم ترمز ضدقفل و مشکلات اصلی کنترل کننده بحث شده است. در ادامه پس از معرفی یک کنترل کننده بسیار ساده، مزایای استفاده از سیستم ترمز ضدقفل با شبیه سازی چند وضعیت نشان داده شده است.

۱ مقدمه

رقابت سازندگان خودرو برای جلب نظر مشتریها، محدودیتهای اقتصادی، و نیز مقرراتی که برای حفظ محیط زیست به تصویب می رسد، باعث سرعت بخشیدن به روند تکامل خودروها شده است. خودروهای امروزی از نظر راحتی، ایمنی و کارایی با خودروهای یک دهه پیش تقریباً قابل مقایسه نیستند. افزایش استفاده از سیستمهای کنترلی پیچیده و پردازنده های دیجیتال در خودرو و نیز روند روبه رشد استفاده از انرژی الکتریکی به جای سوختهای فسیلی باعث افزایش بخشهای الکترونیکی خودرو شده است. به طوری که سیستم برقی یک خودرو پیشرفته امروزی شامل حدود ۱۵۰۰ قطعه سیم، تعداد بی شماری نقطه اتصال، گاهی تا هجده عدد ریزپردازنده و بیش از دوازده عدد حسگر است [۳]. این اندازه از پیچیدگی، در آینده ای نه چندان دور باعث بروز تحولی اساسی در سیستمهای برقی و کنترلی خودرو خواهد شد.

سیستم ترمز در خودروهای امروزی حاصل یک فرایند تکامل طولانی است که از اولین ترمز هیدرولیک عملی در سال ۱۹۱۷ آغاز شده است [۷]. به کارگیری سیستم ترمز ضدقفل از مهمترین گامهایی است که در جهت افزایش کارایی ترمز خودرو برداشته شد. وظیفه این سیستم حفظ پایداری و قابلیت هدایت خودرو و کاهش فاصله ایستادن هنگام ترمزهای شدید است. ABS اولین بار در اوایل دهه ۱۹۵۰ در هواپیما به کار گرفته شد که در آن زمان برای استفاده در خودرو گران بود [۱۲]. اولین سیستم ترمز ضدقفل برای خودرو اواخر دهه ۱۹۶۰ به وجود آمد اما از نظر تجاری ناموفق بود [۱۷]. رشد واقعی فناوری ABS در دهه ۱۹۷۰ با آمدن مدارهای مجتمع و ریزپردازنده ها ممکن شد [۶] و در نتیجه طراحان ABS به استفاده از کنترل کننده های مبتنی بر ریزپردازنده روی آوردند [۹].

امروزه با وجود پیشرفتهایی که در ساخت ترمزهای الکتریکی حاصل شده است [۱۱]، تمام سیستمهای ترمز ضدقفل که به طور انبوه تولید می شوند از کنترل کننده الکترونیکی استفاده می کنند [۲۰].

۲ توصیف سیستم ترمز ضد قفل

بیشتر رانندگان هنگامی که می خواهند خودرو را هرچه زودتر متوقف کنند، پدال ترمز را تا انتها فشار می دهند و با به جای گذاشتن رد لاستیکها روی سطح

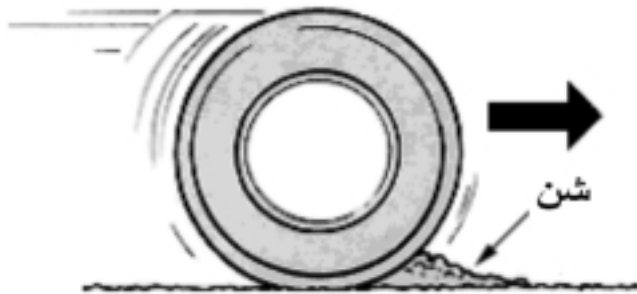
جاده فکر می کنند کار خود را بخوبی انجام داده اند. اما این کار اشتباه است و حاصلی جز فرسوده شدن لاستیکها ندارد. رانندگان حرفه ای در این مواقع با فشار دادن و رها کردن متناوب پدال ترمز مانع قفل شدن چرخها می شوند. این کار دو مزیت دارد. اول این که با جلوگیری از قفل شدن چرخهای جلو، هدایت خودرو از دست راننده خارج نمی شود. مزیت مهمتر و عجیب تر آن، این است که اگر کار بدرستی انجام شود، خودرو در فاصله کوتاهی متوقف می شود. علت این امر آن است که ضریب اصطکاک بین تایر و سطح جاده تابعی غیرخطی از لغزش چرخ است. لغزش معمولاً به صورت زیر تعریف می شود [۱۸]:

$$s = \begin{cases} 1 - \frac{R\omega}{v} & v > R\omega > 0 \\ -1 + \frac{v}{R\omega} & R\omega > v > 0 \end{cases}$$

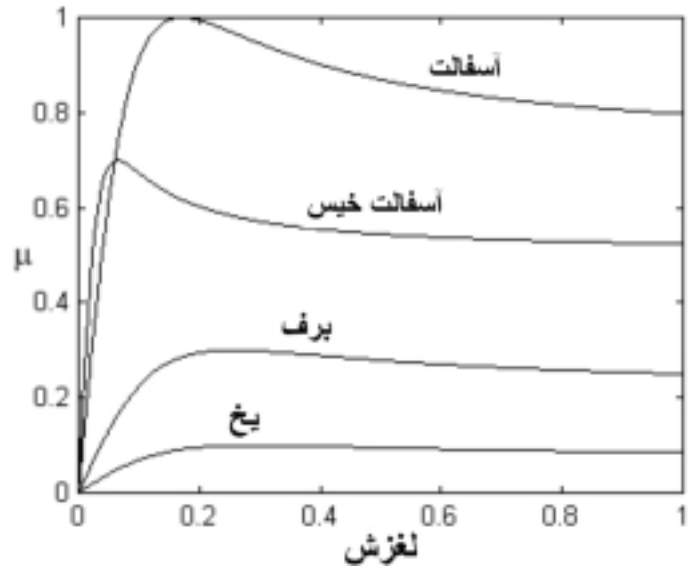
در اینجا ω سرعت زاویه ای چرخش چرخ، R شعاع آن و v سرعت حرکت خطی چرخ در راستای طولی آن است. حرکت آزاد چرخها معادل لغزش صفر و قفل شدن چرخها معادل لغزش ۱ است. لغزش ۱- معادل است با لیز خوردن چرخها در حالی که خودرو حرکت نمی کند. معمولاً رانندگان ماجراجو برای شروع به حرکت از این مقدار لغزش استفاده می کنند!

رابطه ضریب اصطکاک و لغزش به صورت شکل ۱ است [۱۳]. با اینکه این منحنی بسته به شرایط جاده و تایر تغییر می کند، اما اغلب اوقات یک حداکثر (حداقل) برای لغزشهای مثبت (منفی) دارد. این امر برای جاده هایی که با شن یا برف کوبیده نشده پوشیده شده اند، صادق نیست. چون در این موارد با قفل شدن چرخها، شن یا برف جلو تایرها جمع می شود و در برابر حرکت خودرو مقاومت می کند (شکل ۲) [۸]. در این شرایط با قفل شدن چرخها، خودرو زودتر متوقف می شود. اما در این موارد هم قفل شدن چرخها به دلیل از دست رفتن قابلیت هدایت خودرو مطلوب نیست. کنترل کننده ABS همواره سعی می کند با کنترل لغزش چرخها، حداکثر ضریب اصطکاک را به دست آورد. معمولاً مقدار بهینه لغزش بین ۱۰ تا ۳۰ درصد تغییر می کند.

قفل شدن چرخ به طور معمول باعث کاهش تقریباً ۴۰ درصدی اصطکاک بین تایر و سطح جاده می شود [۸]. سیستم ترمز ضدقفل با جلوگیری از قفل شدن چرخها، از حداکثر اصطکاک بین تایر و سطح جاده استفاده می کند و در نتیجه فاصله توقف خودرو را کاهش می دهد. این کاهش فاصله توقف در موارد



شکل ۲ قفل شدن چرخ در جاده شنی



شکل ۱ نمودار ضریب اصطکاک و لغزش

- اگر در ABS عیبی به وجود آمد، باید تا حد امکان رفتار سیستم ایمن باشد و قابلیت هدایت خودرو حفظ شود.
- عیب در ABS باید به اطلاع راننده برسد.
- تغییر و نگهداری ABS با مهارت‌های کنونی تعمیر و نگهداری باید قابل انجام باشد.

۴ اجزای سیستم ترمز ضد قفل

ساختار یک سیستم ترمز ضد قفل را می‌توان به سه بخش حسگرها، بخش هیدرولیکی، و کنترل‌کننده تقسیم کرد.

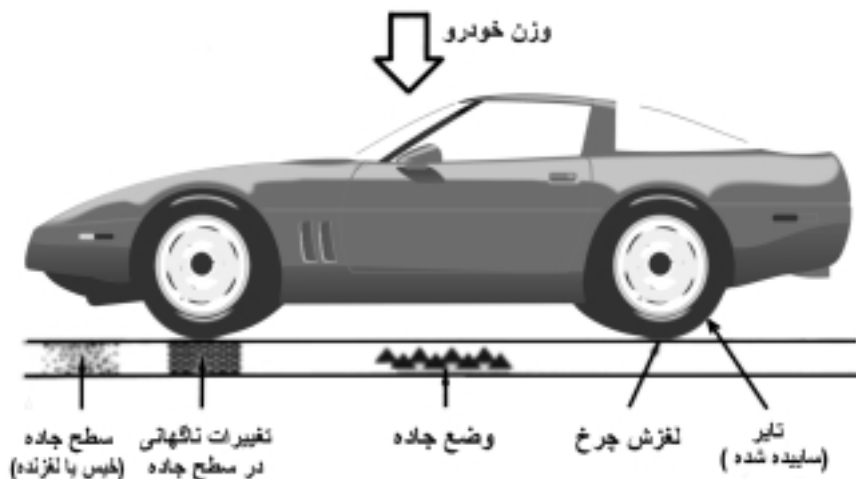
۱.۳ حسگرها

حسگر سرعت چرخش چرخ، یک جزء ثابت همه سیستم‌های ABS است. این حسگر از یک حلقه دندانه‌دار و یک سیم پیچ با هسته مغناطیس دائم تشکیل می‌شود (شکل ۴) [۸]. حلقه دندانه‌دار روی محور چرخ نصب می‌شود و با آن می‌چرخد. با عبور دندانه‌های این حلقه از نزدیکی سیم پیچ، میدان مغناطیسی تغییر می‌کند و در نتیجه ولتاژ القایی در سیم پیچ به وجود می‌آید. با اندازه‌گیری فرکانس ولتاژ دو سر سیم پیچ، اندازه سرعت چرخش چرخ به دست می‌آید. در یک سیستم ABS بسته به نوع آن از یک تا چهار حسگر سرعت چرخ استفاده

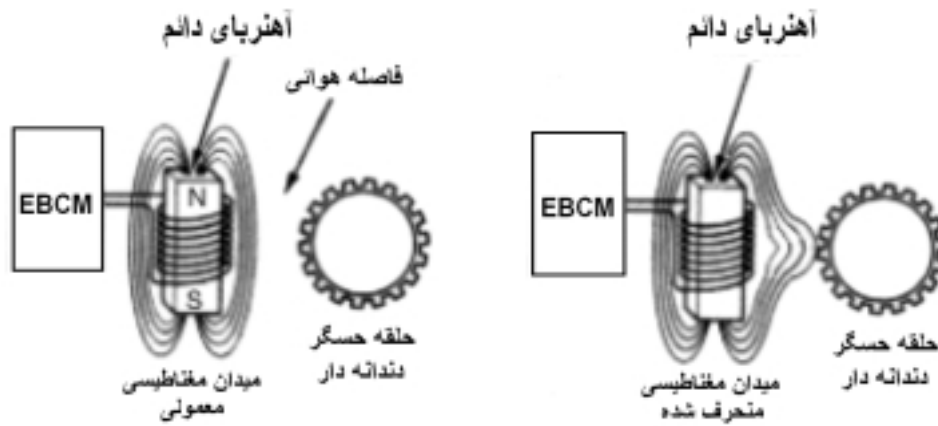
بسیاری می‌تواند از خسارت‌های ناشی از تصادف جلوگیری کند. البته رانندگان خودروهای مجهز به ABS هم باید با احتیاط رانندگی کنند. گاهی این رانندگان به گمان اینکه ABS در هر شرایطی می‌تواند آنها را از خطر برهاند، دست به بی احتیاطی‌هایی می‌زنند که جبران‌ناپذیر است. بنابراین اغراق درباره مزیت‌های ABS به هیچ وجه توصیه نمی‌شود! [۱۰].

شرایط سطح جاده از نظر ناهمواری و میزان لغزندگی آن، نوع پوشش تایر، وزن خودرو و چگونگی توزیع آن بین چرخ‌ها از جمله عواملی است که بر عملکرد ترمز تأثیر می‌گذارد (شکل ۳) [۸]. سیستم ترمز ضد قفل باید با وجود تغییر شرایط محیطی، کارایی خوبی داشته باشد و نکات زیر در طراحی آن در نظر گرفته شود [۱۰].

- حفظ قابلیت هدایت خودرو از حداقل کردن فاصله ایستادن مهمتر است.
- ABS باید از اصطکاک بین تایر و سطح جاده به طور بهینه استفاده کند.
- ABS باید در برابر تغییر ضریب اصطکاک جاده مقاوم باشد.
- هنگام ترمز، ABS باید پایداری خودرو را حفظ کند و به ویژه در مواقعی که ضریب اصطکاک جاده برای چرخ‌های دو طرف خودرو متفاوت است، مانع چرخیدن خودرو به دور خود شود.
- هنگام دور زدن، ABS باید شرایط پایداری را برای ترمز فراهم کند.
- قابلیت اطمینان ABS، باید تا حد امکان بالا باشد.



شکل ۳ شرایط مختلف مؤثر بر عملکرد ترمز



شکل ۴ حسگر سرعت چرخش چرخ

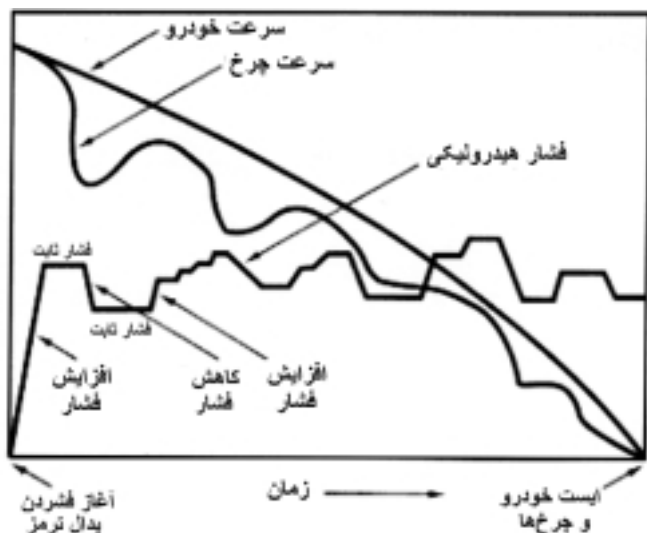
EBCM: Electronic Brake Control Module

۲. حالت فشار ثابت: در این حالت هر دو شیر بسته هستند و فشار روغن در سیلندر ترمز ثابت می ماند.

۳. حالت کاهش فشار: در این حالت شیر ورودی بسته و شیر خروجی باز است. به این ترتیب روغن سیلندر ترمز، به مخزن برمی گردد و فشار کاهش می یابد. در برخی مدل های ABS به جای دو شیر ورودی و خروجی، از یک شیر استفاده می شود. این شیر در یک حالت اجازه می دهد روغن پرفشار وارد سیلندر ترمز شود و در حالت دیگر روغن را به مخزن برمی گرداند و در نتیجه فشار روغن در سیلندر را کاهش می دهد. یکی از روشهای کنترل فشار روغن با استفاده از این شیر، کنترل PWM است [۸]. در این روش، حالت شیر به صورت متناوب تغییر داده می شود. در هر دوره تناوب، نسبت مدت افزایش فشار به کل دوره تناوب با توجه به مقدار مطلوب فشار تنظیم می شود. یک نمونه بخش هیدرولیکی ABS که در آن از شیر با کنترل PWM استفاده شده، در شکل ۷ نشان داده شده است [۸].

بعضی سازنده ها در مدار هیدرولیکی از یک شیر جدا ساز^۵ استفاده می کنند تا در صورت لزوم بتوان مدار ABS را از سیستم ترمز جدا کرد (شکل ۷). به کمک این شیر می توان در مواقعی که ABS دچار اشکال می شود تا زمان برطرف شدن اشکال از ترمز معمولی استفاده کرد. سیستم های ABS بسته به تعداد چرخهایی که به طور مستقل کنترل می کنند، به چهار گروه زیر تقسیم می شوند.

۱. یک کاناله: در این سیستمها فقط چرخهای عقب مجهز به ABS است و فشار ترمز آنها با هم کنترل می شود. از ABS یک کاناله معمولاً در وانت ها



شکل ۶ مراحل کنترل فشار ترمز

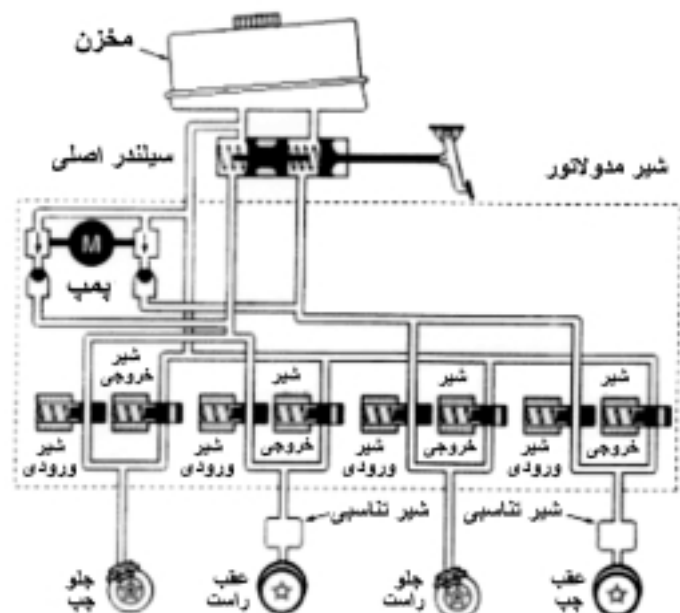
می شود. در سیستمهای کاملتر از شتاب سنج و حسگر سرعت زاویه چرخش^۲ نیز استفاده می شود [۵]. به کارگیری این حسگرها در خودرو با پیشرفت فناوری ساخت آنها ممکن شده است.

امروزه فناوری MEMS^۳، تولید تجاری شتاب سنجهای نیمه هادی را ممکن ساخته است. ADXL-05 محصول شرکت Analog Devices از این نوع شتاب سنجها است [۲۴ و ۲۲]. گستره تمام مقیاس این شتاب سنج $\pm 5g$ است. این محصول در بسته ده پایه فلزی با گستره دمای تجاری ۰ تا ۷۰ درجه سانتیگراد و با تغذیه ۵V عرضه شده است.

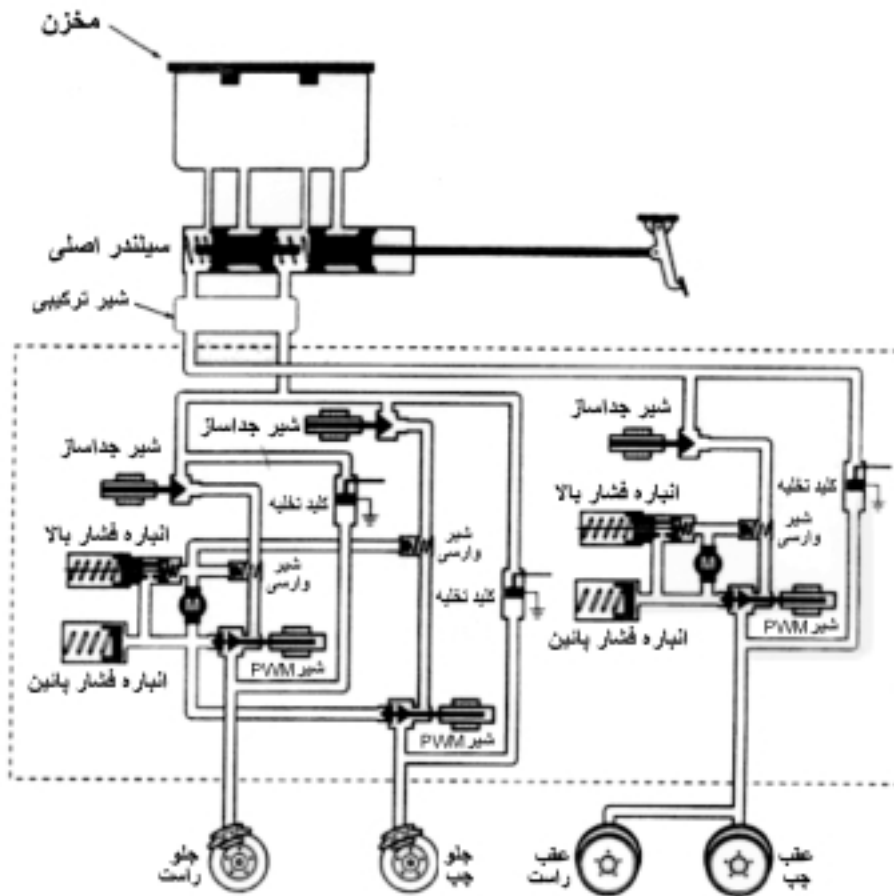
۲.۳ بخش هیدرولیکی

شکل ۵ ساختار کلی بخش هیدرولیکی ABS را نشان می دهد [۸]. اجزای اصلی این بخش را سیلندر اصلی، پمپ، مخزن، و شیرهای ورود و خروج روغن برای هر چرخ تشکیل می دهند. هنگامی که ABS کنترل ترمز را به عهده می گیرد با روشن شدن پمپ، فشار روغن افزایش می یابد. بسته به وضعیت شیرهای ورودی و خروجی، سه حالت زیر برای کنترل فشار روغن در سیلندر ترمز هر چرخ وجود دارد.

۱. حالت افزایش فشار: در این حالت شیر ورودی باز و شیر خروجی بسته می شود. با این کار فشار روغن در سیلندر ترمز افزایش می یابد.



شکل ۵ بخش هیدرولیکی ABS



شکل ۷ بخش هیدرولیکی یک سیستم ABS سه کاناله

استفاده می‌شود. چون چرخهای عقب وانت به‌خصوص زمانی که وانت خالی باشد، هنگام ترمزهای شدید براحتی قفل می‌شوند، اگر چرخهای عقب پیش از چرخهای جلو قفل شوند، با کوچکترین حرکت فرمان، انتهای خودرو منحرف می‌شود. این درباره تمام خودروها صادق است.

برای جلوگیری از این امر، در سیستم ترمز یک شیر تناسبی^۶ در نظر گرفته می‌شود. با این شیر همواره فشار ترمز بیشتری به چرخهای جلو وارد می‌شود. در نتیجه چرخهای جلو زودتر از چرخهای عقب قفل می‌شوند. اما در وانت‌ها به دلیل تغییر زیاد بار عمودی روی چرخهای عقب، شیر تناسبی کارایی خوبی ندارد.

۲. دو کاناله: در این نوع ABS چرخهای جلو با هم و چرخهای عقب با هم یا چرخها به‌طور ضربدری با هم کنترل می‌شود.

۳. سه کاناله: اکثر خودروهای دیفرانسیل عقب و تعداد زیادی از خودروهای دیفرانسیل جلو از ABS سه کاناله استفاده می‌کنند. در این سیستم چرخهای عقب با هم و چرخهای جلو جداگانه کنترل می‌شوند. مدار هیدرولیکی یک ABS سه کاناله در شکل ۷ نشان داده شده است.

۴. چهار کاناله: ABS چهار کاناله کاملترین و گرانترین نوع ABS است. در این سیستم هر یک از چهار چرخ جداگانه کنترل می‌شوند.

۴.۲ واحد کنترل الکترونیکی

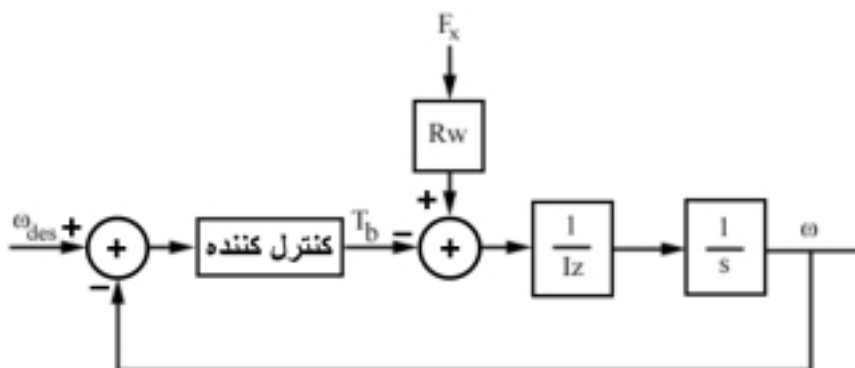
در سیستم ترمز ضدقفل یک واحد کنترل الکترونیکی^۷ وجود دارد که با پردازش اطلاعات دریافتی از حسگرها، بخش هیدرولیکی را کنترل می‌کند. در شکل ۸ سرعت خودرو، سرعت چرخ و فشار روغن در سیلندر ترمز در شرایطی که کنترل کننده ABS کنترل ترمزها را برعهده دارد، نشان داده شده است [۸]. کنترل کننده با تنظیم فشار روغن در سیلندر ترمز، مانع قفل شدن چرخها می‌شود.

۴ الگوریتم کنترل ABS

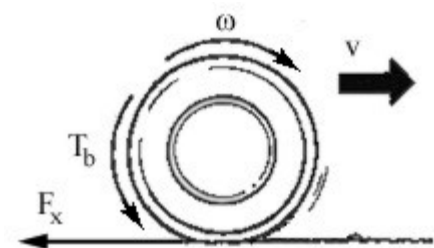
با وجود اینکه امروزه از ABS در بسیاری از خودروها استفاده می‌شود، شیوه‌های مرسوم برای کنترل آن مبتنی بر یک مجموعه قوانین اگر-آنگاه است که تا حد زیادی با آزمایشهای عملی تنظیم می‌شوند [۱۶]. یک الگوریتم کنترل ABS به‌طور معمول از چندصد قانون اگر-آنگاه تشکیل می‌شود [۲۰]. رقابت بین سازندگان در دستیابی به کنترل کننده‌هایی با عملکرد مقاومت بیشتر نسبت به تغییر شرایط کار، باعث توجه به استفاده از پیشرفته کنترل در طراحی کنترل کننده ABS شده است. در یک د

تحقیقات زیادی برای طراحی کنترل کننده ABS با استفاده از روشهای کنترل فازی^۸ [۱۵ و ۱۴]، کنترل تطبیقی^۹ [۲۱]، و کنترل مد لغزشی^{۱۰} [۲۴، ۱۹، ۲۰] انجام شده است. برخی از مشکلات اصلی در طراحی یک کنترل کننده ABS به شرح زیر است.

۱. برای کارایی بهینه، کنترل کننده باید در یک نقطه تعادل ناپایدار (قله منحنی ضریب اصطکاک بر حسب لغزش) کار کند. علت ناپایداری این نقطه آن است که اگر لغزش چرخ در قله منحنی قرار داشته باشد، کمی افزایش لغزش باعث کاهش نیروی اصطکاک و کاهش سرعت چرخش چرخ و در نتیجه افزایش بیشتر لغزش می‌شود و به همین ترتیب لغزش تا مقدار بیشینه خود یعنی ۱+ افزایش می‌یابد، مگر اینکه گشتاور ترمز کاهش یابد.
۲. سرعت حرکت خطی چرخ که نقش اساسی در کنترل ABS دارد، به‌طور مستقیم قابل اندازه گیری نیست.



شکل ۹ نمودار بلوکی کنترل کننده ABS



شکل ۸ مدل چرخ

۳. رابطه ضریب اصطکاک با لغزش، غیرخطی، متغیر با زمان، و همراه با عدم قطعیت زیاد است.
 ۴. مقدار بهینه لغزش به شرایط جاده و تایر بستگی دارد.
 ۵. در جاده‌های ناهموار میزان تماس تایر با سطح جاده بشدت تغییر می‌کند.
 ۶. دینامیک سیستم ترمز غیرخطی و شامل تأخیر است.
- در این بخش با هدف آشنایی با نقش کنترل‌کننده در سیستم ترمز ضدقفل، ابتدا یک فرمول‌بندی ساده از مسئله ارائه شده است و پس از آن نتایج شبیه‌سازی چند وضعیت، برای نشان دادن مزایای ABS آورده شده است.

۱.۴ یک کنترل‌کننده ساده

مرحله اول در طراحی کنترل‌کننده، مدل‌سازی خودرو است. در اینجا برای جلوگیری از پیچیده شدن بحث، تنها یک مدل ساده برای چرخ خودرو در نظر گرفته شده است. مدل‌های پیچیده‌تر خودرو در مرجع [۲۳] شرح داده شده است. مدل چرخ در شکل ۸ نشان داده شده است. طبق این مدل معادله دینامیکی چرخ به‌صورت زیر است.

$$\dot{\omega} = \frac{1}{I_{\omega}} (R_{\omega} F_x - T_b)$$

در این معادله، ω سرعت زاویه‌ای، I_{ω} ممان اینرسی، و R_{ω} شعاع چرخ است. F_x نشان‌دهنده نیروی اصطکاک طولی بین تایر و جاده، و T_b گشتاور ترمز است.

وظیفه کنترل‌کننده ABS، تنظیم مقدار لغزش چرخ در یک حد مطلوب است. لغزش چرخ هنگام ترمز با استفاده از رابطه ۱ به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$s = 1 - \frac{R_{\omega} \omega}{v}$$

v سرعت حرکت خطی چرخ است که می‌توان آن را با سرعت حرکت خودرو تقریب زد. وظیفه کنترل‌کننده ABS، تنظیم کردن مقدار لغزش چرخ در یک مقدار مطلوب است. اگر مقدار مطلوب لغزش چرخ را s_{des} بنامیم، مقدار مطلوب سرعت چرخ (ω_{des}) با استفاده از رابطه ۳ به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\omega_{des} = \frac{1 - s_{des}}{R_{\omega}} v$$

کنترل‌کننده باید T_b را به‌گونه‌ای تعیین کند که ω مقدار مطلوب خود (ω_{des}) را دنبال کند. نمودار بلوکی مسئله در شکل ۹ نشان داده شده است. ساده‌ترین روش کنترل ABS، استفاده از یک کنترل‌کننده روشن-خاموش^{۱۱} است. در این حالت قانون کنترل به‌صورت زیر است.

$$T_b = \begin{cases} T_{b \max} & \text{اگر } s < s_{\max} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

در اینجا $T_{b \max}$ حداکثر گشتاور ترمز است. بر اساس این قانون کنترل، اگر لغزش از مقدار مطلوب s_{des} کمتر باشد، کنترل‌کننده با بیشترین قدرت ترمز می‌گیرد و در صورتی که لغزش از مقدار مطلوب بیشتر شود، ترمز را رها می‌کند. توجه کنید که کنترل‌کننده تا زمانی که به کار خود ادامه می‌دهد که خودرو بایستد یا راننده پای خود را از روی پدال ترمز بردارد.

۲.۴ نتایج شبیه‌سازی در مورد چند وضعیت

در این بخش با استفاده از شبیه‌سازی چند وضعیت نمونه، مزایای سیستم ترمز ضدقفل نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی این وضعیت‌ها از یک مدل با شانزده درجه آزادی برای خودرو [۲۳]، یک مدل غیرخطی برای محرک‌های ترمز [۲]، یک مدل تحلیلی برای تایرها [۱۸] و الگوریتم کنترل ABS ارائه شده در مراجع [۲۳] و [۲۴] استفاده شده است. در ادامه، مشخصات هر یک از وضعیت‌ها شرح داده شده است.

۱. ترمز در مسیر مستقیم: در این وضعیت سرعت اولیه خودرو ۱۰۰ کیلومتر در ساعت است و راننده از لحظه اول پدال ترمز را تا آخرین حد می‌فشارد. در شکل ۱۰ مسیر حرکت خودرو در دو حالت با ABS و بدون ABS نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که کنترل‌کننده ABS، ۲۲/۵ متر از فاصله توقف کاسته است.

۲. ترمز هنگام دور زدن: در این وضعیت سرعت اولیه خودرو ۸۰ کیلومتر در ساعت است. در $t = ۰.۵ \text{ sec}$ راننده فرمان را به‌اندازه ۰/۱ رادیان به سمت چپ می‌چرخاند و در $t = ۱ \text{ sec}$ پدال ترمز را تا انتها فشار می‌دهد. شکل ۱۱ مسیر حرکت خودرو در این وضعیت را در دو حالت بدون ABS و با ABS نشان می‌دهد. در حالت بدون ABS چون چرخ‌ها قفل می‌شوند، هدایت خودرو از دست راننده خارج می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، با وجود اینکه راننده فرمان را به سمت چپ چرخانده است، خودرو به مسیر مستقیم خود ادامه داده است و حتی کمی به راست منحرف شده است. اما در این وضعیت با استفاده از ABS قابلیت هدایت خودرو حفظ شده است.

۳. ترمز در جاده‌ای با ضریب اصطکاک دوگانه: در وضعیت سوم ضریب اصطکاک جاده ۰/۸۵ است و خودرو با سرعت اولیه ۸۰ کیلومتر در ساعت حرکت می‌کند. در لحظه $t = ۰.۷ \text{ sec}$ راننده پدال ترمز را تا انتها فشار می‌دهد. در $t = ۱ \text{ sec}$ ضریب اصطکاک جاده در سمت چپ خودرو از ۰/۸۵ به ۰/۴ کاهش می‌یابد. نتیجه این آزمایش در دو حالت با ABS و بدون ABS در شکل ۱۲ آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، خودرو بدون ABS کاملاً منحرف شده است. در حالی که خودرو مجهز به ABS، پایداری جانبی خود را حفظ کرده است.

پاسگزاری

بر خود لازم می‌دانم از استاد ارجمند آقای دکتر سید کمال‌الدین نیکروش که از توجهات و راهنمایی‌های ارزنده ایشان در زمان تحقیق روی پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود استفاده فراوان برده‌ام، تشکر و قدردانی نمایم.

مراجع

- [1] Y. K. Chin, et al, "Sliding-mode ABS wheel-slip control," Proc. 1992 Amer. Contr. Conf., San Diego, CA, pp. 1-5, 1992.
- [2] S. Drakunov, et al, "ABS control using optimum search via sliding modes," IEEE Tran. Contr. Syst. Technol., Vol. 3, No. 1, pp. 79-85, March 1995.
- [3] J. G. Kassakian, H. C. Wolf, J. M. Miller and C. J. Hurton, "Automotive electrical systems circa 2005," IEEE Spectrum, Vol. 33, No. 8, pp. 22-27, Aug. 1996.
- [4] J. Kung, "Analog devices, university of California at Berkely, arpa IMEMS home page," <http://nitride.eecs.berkely.edu:8001>.
- [5] J. Mack, ABS-TCS-VDC Where Will the Technology Lead US?, Society of Automotive Engineers Inc., 1996
- [6] J. Gerstenmeier, "Electronic control unit for passenger car anti-skid (ABS)," Proc. I. Mech. E., Paper C186/81, 1981.
- [7] M. J. Gutnecht, D. R. Schniedewend, J. J. Moskwa, C. R. Kime and P. Ramanathan, "Fault tolerance analysis of alternate automotive brake system designs," SAE Technical Paper No. 930511, 1993.
- [8] J. D. Halderman, Automotive Brake Systems, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1996.
- [9] H. Leiber and A. Czinczel, "The potential and problems involved in integrated anti-lock braking systems," Proc. Conf. Anti-lock braking systems for road vehicles, (I. Mech. E. Conf. Publ. 1985-8, London), 1985.

[15] C. Sobottka and T. Singh, "Optimal fuzzy logic control for an anti-lock braking system," Proc. 1996 Conf. Contr. Applicat., Dearborn, MI, pp. 49-54, 1996.

[16] R. Srinivasa, R. R. Gunter and J. Y. Wong, "Evaluation of the performance of anti-lock brake systems using laboratory simulation techniques," Proc. Ine. J. Veh. Des., Vol. 1, No. 5, pp. 467-485, 1980.

[17] E. E. Stewart and L. L. Bowler, "Road testing of wheel slip control systems," SAE Tech-nical Paper No. 690215, 1969.

[18] H. T. Szostak, R. W. Allen, and T. J. Rosenthal, "Analytical modeling of a driver response in crash avoidance maneuvering, Vol. II: An interactive tire model for driver/vehicle simulation," U.S. Department of Transportation, report no. DOT HS 807-271, April 1988.

[19] S. Taheri and E. H. Law, "Investigation of a combined slip control braking and closed loop four wheel steering system for an automobile during combined hard braking and severe steering," Proc. 1990 Amer. Contr. Conf., San Diego, CA, pp. 1862-1867, 1990.

[20] P. E. Wellstead and N. B. O. L. Pettit, "Analysis and redesign of an antilock brake system controller," IEE Proc. Control Theory Appl., Vol. 144, No. 5, pp. 413-426, September 1997.

[21] J. S. Yu, "A robust adaptive wheel-slip controller for antilock brake system," Proc. 1997 Conf. Decision Contr., San Diego, California USA, pp. 2545-2546, 1997.

[۲۲] داریوش شیری و محمود حیدر طجری، تکنولوژی ساخت، طراحی و کاربرد میکروشتاب سنجها، نخستین کنفرانس دانشجویی مهندسی برق ایران، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف، آبان ۱۳۷۷.

[۲۳] بهزاد صمدی، تشخیص و شناسایی عیب و تطابق با آن در سیستم ترمز ضدقفل (ABS) با استفاده از روشهای مبتنی بر مدل، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، بهمن ۱۳۷۷.

[۲۴] بهزاد صمدی و سید کمال الدین نیکروش، کنترل کننده لغزشی برای کنترل لغزش چرخهای خودرو، هفتمین کنفرانس مهندسی برق ایران، مرکز تحقیقات مخابرات ایران، اردیبهشت ۱۳۷۸.

[10] R. Limpert, Brake Design and Safety, Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.

[11] W. C. Lin, D. G. Dobner and R. D. Fruechte, "Design and analysis of an antilock brake control system with electric brake actuator," Proc. Int. J. Veh. Des., Vol. 14, No. 1, pp. 13-43, 1993.

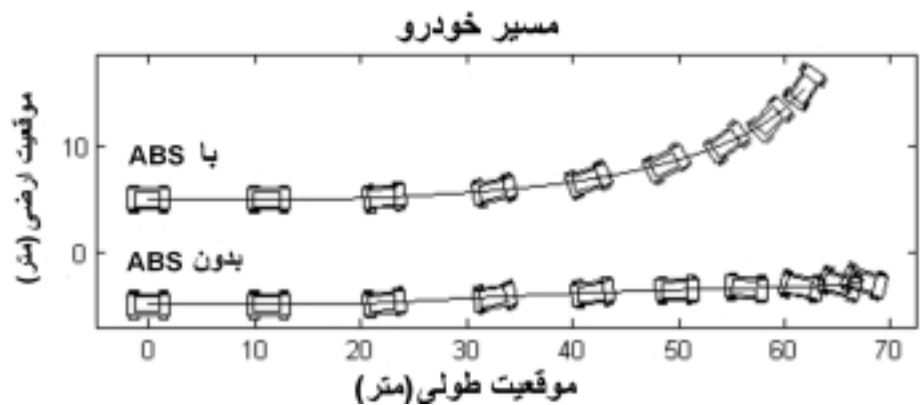
[12] R. H. Madison and H. E. Riordan, "Evolution of the sure track brake system," SAE Technical Paper No. 690213, 1969.

[13] N. Matsumoto and M. Tomizuka, "Vehicle lateral velocity and yaw rate control with two independent control inputs," Proc. 1990 Amer. Contr. Conf., San Diego, CA, pp. 1868-1875, 1990.

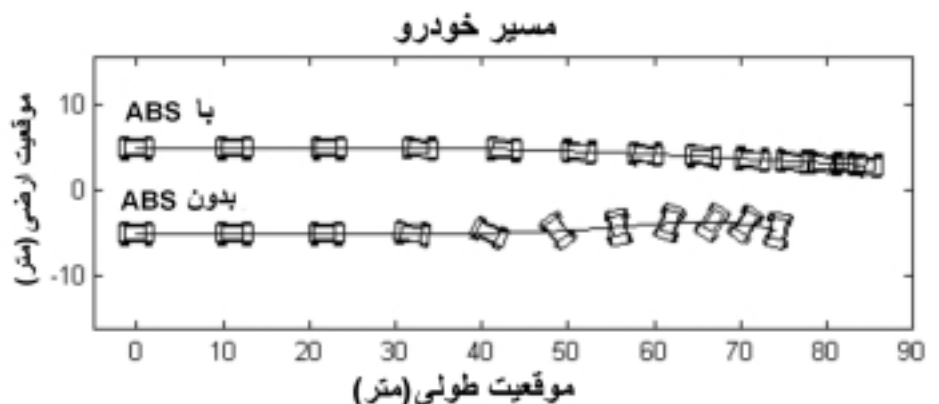
[14] G. F. Mauer, "A fuzzy logic controller for an ABS braking system," IEEE Tran. Fuzzy Syst., Vol. 3, No. 4, pp. 381-388, Nov. 1995.



شکل ۱۰ ترمز در مسیر مستقیم



شکل ۱۱ ترمز در حال دور زدن



شکل ۱۲ ترمز در جاده ای با ضریب اصطکاک دوگانه

- ۱ Antilock Braking System
- ۲ yaw rate
- ۳ Micro Electro Mechanical System
- ۴ Pulse Width Modulation
- ۵ isolation valve
- ۶ proportional valve
- ۷ Electronic Control Unit
- ۸ fuzzy control
- ۹ adaptive control
- ۱۰ sliding mode control
- ۱۱ on-off